

# Document made available under the Patent Cooperation Treaty (PCT)

International application number: PCT/EP05/001949

International filing date: 24 February 2005 (24.02.2005)

Document type: Certified copy of priority document

Document details: Country/Office: DE  
Number: 10 2004 010 571.5  
Filing date: 26 February 2004 (26.02.2004)

Date of receipt at the International Bureau: 25 April 2005 (25.04.2005)

Remark: Priority document submitted or transmitted to the International Bureau in compliance with Rule 17.1(a) or (b)



World Intellectual Property Organization (WIPO) - Geneva, Switzerland  
Organisation Mondiale de la Propriété Intellectuelle (OMPI) - Genève, Suisse

**BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND****Prioritätsbescheinigung über die Einreichung  
einer Patentanmeldung**

**Aktenzeichen:** 10 2004 010 571.5

**Anmeldetag:** 26. Februar 2004

**Anmelder/Inhaber:** Carl Zeiss SMT AG, 73447 Oberkochen/DE

**Bezeichnung:** Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-  
Projektionsbelichtungsanlage

**IPC:** G 03 F 7/20

Die angehefteten Stücke sind eine richtige und genaue Wiedergabe der ursprünglichen Unterlagen dieser Patentanmeldung.

München, den 1. April 2005  
**Deutsches Patent- und Markenamt**  
**Der Präsident**  
Im Auftrag

**Stanschus**



Anmelder:

Carl Zeiss SMT AG  
Carl-Zeiss-Strasse 22  
73447 Oberkochen

Unser Zeichen: P 43476 DE

25. Februar 2004 Mu/SR

Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-  
Projektionsbelichtungsanlage

5

Die Erfindung bezieht sich auf ein Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Beleuchtung eines Beleuchtungsfeldes mit dem Licht einer primären Lichtquelle.

10 Die Leistungsfähigkeit von Projektionsbelichtungsanlagen für die mikrolithographische Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen wird wesentlich durch die Abbildungseigenschaften der Projektionsobjektive bestimmt. Darüber hinaus werden die Bildqualität und der mit einer Anlage erzielbare Wafer-Durchsatz wesentlich durch Eigenschaften des dem Projektionsobjektiv vorgeschalteten Beleuchtungssystems mitbestimmt. Dieses muss in der Lage sein, das Licht einer primären Lichtquelle, beispielsweise eines Lasers, mit möglichst hohem Wirkungsgrad in eine für die optische Projektion günstige Intensitätsverteilung einer sekundären Lichtquelle zu transformieren und dabei in einem Beleuchtungsfeld des Beleuchtungssystems eine möglichst gleichmäßige Intensitätsverteilung zu erzeugen. Sofern es sich um Beleuchtungssysteme mit variabel einstellbaren Beleuch-

- 2 -

P 43476

tungsmodi handelt, sollen die Spezifikationsanforderungen an die Beleuchtung bei allen Beleuchtungsmodi gleichermaßen erfüllt sein, beispielsweise bei konventionellen Settings mit verschiedenen Kohärenzgraden oder bei Ringfeld-, Dipol- oder Quadrupolbeleuchtung. Diese Beleuchtungsmodi werden wahlweise eingestellt, um die Beleuchtung entsprechend der Strukturen der einzelnen abzubildenden Vorlagen (Masken) zu optimieren.

Eine zunehmend wichtig werdende Forderung an Beleuchtungssysteme besteht darin, dass sie in der Lage sein sollen, Ausgangslicht für die Beleuchtung einer Maske (Retikel) mit einem möglichst genau definierten Polarisationszustand bereitzustellen. Beispielsweise kann es gewünscht sein, dass das auf die Photomaske oder in das nachfolgende Projektionsobjektiv fallende Licht weitgehend oder vollständig linear polarisiert ist. Mit linear polarisiertem Eingangslicht können z.B. katadioptrische Projektionsobjektive mit Polarisationsstrahlteiler (beam splitter cube, BSC) mit einem hohen Transmissionswirkungsgrad arbeiten. Es kann auch gewünscht sein, im Bereich der Photomaske weitgehend unpolarisiertes oder zirkular, tangential oder radial polarisiertes Licht bereitzustellen, beispielsweise um strukturellungsabhängige Auflösungsdivergenzen zu vermeiden.

Ein hoher Grad von Gleichmäßigkeit bzw. Homogenität der auf die Photomaske (Retikel) fallenden Beleuchtung kann durch Mischung des von der Lichtquelle kommenden Lichtes mit Hilfe einer Lichtmischeinrichtung erreicht werden. Bei Lichtmischeinrichtungen unterscheidet man im wesentlichen zwischen Lichtmischeinrichtungen mit Wabenkondensoren und Lichtmischeinrichtungen mit Integratorstäben bzw. Lichtmischstäben. Diese Systeme haben spezifische Vor- und Nachteile.

30

Systeme mit Integratorstäben zeichnen sich durch einen überlegenen Transmissionswirkungsgrad aus. Sie arbeiten häufig mit unpolarisiertem

Eingangslicht, was für die Abbildung beispielsweise im Hinblick auf die Strukturrichtungsabhängigkeit der Auflösung oder auf Probleme mit der durch Selbstinterferenz des Laserlichtes verursachten Erzeugung von mikroskopischen Intensitätsmaxima (Speckles) vorteilhaft ist. Ein Nachteil bei diesen Lichtmischsystemen ist, dass sie einen gegebenen Polarisationszustand des Eingangslichtes verändern.

- Systeme mit Wabenkondensor zur Lichtmischung können dagegen die Polarisierung des Eingangslichtes weitgehend erhalten. Dies ist beispielsweise dann günstig, wenn das Projektionsobjektiv mit polarisiertem Licht zu betreiben ist und als Lichtquelle ein Laser verwendet wird, dessen Ausgangslicht bereits praktisch vollständig polarisiert ist. Systeme mit Wabenkondensoren haben jedoch andere Nachteile. Beispielsweise ist es im Allgemeinen nicht möglich, den Kohärenzgrad der Beleuchtung ( $\sigma$ -Wert) ohne Effizienzverlust kontinuierlich zu variieren. Besonders bei Verwendung von annularer oder polarer Beleuchtung ergeben sich Schwierigkeiten. Diese Beleuchtungsparameter haben jedoch für die lithographische Abbildung besonders bei kleinen  $k$ -Faktoren ( $k = 0,3 - 0,5$ ) eine große Bedeutung. Systeme mit Wabenkondensoren benötigen im allgemeinen Blenden zur Ausblendung eines Teils der durchtretenden Lichtenergie, beispielsweise um die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung nicht zu beeinträchtigen. Blenden in solchen Systemen dienen häufig auch dazu, durch Ausblendung eines Teils der Lichtintensität annuläre Beleuchtung oder polare Beleuchtung (z.B. Dipol- oder Quadrupolbeleuchtung) zu erzielen. Systeme mit Wabenkondensoren zur Lichtmischung sind im allgemeinen auch empfindlich in Bezug auf die Erzeugung der erwähnten Speckle-Effekte, die auf mikroskopischer Skala zu ungleichförmiger Beleuchtung führen.
- 30 Ein Wabenkondensor im Sinne dieser Anmeldung hat mindestens eine Rasteranordnung optischer Rasterelemente (Waben), um aus einem auf die Rasteranordnung fallenden Lichtbündel eine der Anzahl der beleuch-

- teten Rasterelemente entsprechende Zahl von Lichtbündeln zu formen, die räumlich voneinander getrennt sind. Soll das Licht ausgedehnter Lichtquellen homogenisiert und an eine bestimmte Feldform angepasst werden, ist ein mehrstufiger Aufbau erforderlich. Dabei erzeugt eine Rasteranordnung erster Rasterelemente aus dem einfallenden Licht eine Rasteranordnung sekundärer Lichtquellen, deren Anzahl der Zahl der beleuchteten ersten Rasterelemente entspricht. Die Form der ersten Rasterelemente soll im wesentlichen der Form des zu beleuchtenden Feldes entsprechen. Sie werden daher auch als Feldwaben bezeichnet.
- 10 Eine nachfolgende Rasteranordnung zweiter Rasterelemente dient dazu, die ersten Rasterelemente in die Beleuchtungsfläche, in der das Beleuchtungsfeld entsteht, abzubilden und dabei das Licht der sekundären Lichtquellen im Beleuchtungsfeld zu überlagern. Die zweiten Rasterelemente werden häufig als Pupillenwaben bezeichnet. Üblicherweise sind die ersten und zweiten Rasterelemente einander paarweise zugeordnet und bilden eine Anzahl optischer Kanäle, deren unterschiedliche Lichtintensitäten im Beleuchtungsfeld im Sinne einer Homogenisierung der Intensitätsverteilung überlagert werden.

- 20 Die Patente US 6,211,944 B1, US 6,252,647 B1 und US 5,576,801 zeigen Beispiele für die Verwendung von Wabenkondensoren als Lichtmischelemente in Beleuchtungssystemen mikrolithographischer Projektionsbelichtungsanlagen. Beschrieben ist auch die Verwendung von Raumfiltern in Verbindung mit Wabenkondensoren zur Einstellung bestimmter Beleuchtungsmodi wie Ringbeleuchtung, Dipolbeleuchtung oder Quadrupolbeleuchtung.

- 30 Das Patent EP 0 949 541 A2 zeigt Beispiele für Beleuchtungssysteme, bei denen mit Hilfe unterschiedlicher diffraktiver optischer Elemente in Kombination mit Axilkons sowie Zoom-Elementen verschiedene Multipol-Beleuchtungsmodi einstellbar sind, bei denen mindestens ein räumlicher Parameter kontinuierlich variiert werden kann. In diesem Beleuchtungs-

system kommt u.a. ein Wabenkondensor als Lichtmischeinrichtung zum Einsatz.

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein Beleuchtungssystem für eine mikrolithographische Projektionsbelichtungsanlage bereitzustellen, welches eine weitgehend polarisationserhaltende Lichtmischeinrichtung hat und zur Erzeugung einer im Wesentlichen homogenen Lichtverteilung in einer Feldebene des Beleuchtungssystems ausgelegt ist. Insbesondere soll sich das Beleuchtungssystem durch hohe Transmission (wenig Lichtverlust) und einen einfachen Aufbau auszeichnen.

Zur Lösung dieser Aufgabe stellt die Erfindung ein Beleuchtungssystem mit den Merkmalen von Anspruch 1 bereit. Vorteilhafte Weiterbildungen sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben. Der Wortlaut sämtlicher Ansprüche wird durch Bezugnahme zum Inhalt der Beschreibung gemacht.

Ein erfindungsgemäßes Beleuchtungssystem soll für die Anwendung in einer Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage geeignet sein und dient der Beleuchtung eines in einer Beleuchtungsfläche des Beleuchtungssystems angeordneten Beleuchtungsfeldes mit dem Licht einer primären Lichtquelle. Diese normalerweise ebene Beleuchtungsfläche ist in der Regel eine Feldebene des Beleuchtungssystems und kann bei eingebautem Beleuchtungssystem optisch konjugiert zur Objektebene des Projektionsobjektivs liegen oder dieser Ebene entsprechen. Als primäre Lichtquelle kann beispielsweise ein im Ultraviolettbereich arbeitender Laser dienen, der beispielsweise eine Arbeitswellenlänge von 248 nm, 193 nm, 157 nm oder darunter bereitstellt. Auch andere Lichtquellen und/oder kürzere oder größere Wellenlängen sind möglich. Das Beleuchtungssystem umfasst mehrere entlang seiner optischen Achse angeordnete optische Systeme. Eine Lichtverteilungseinrichtung dient zum Empfang von Licht der primären Lichtquelle und zur Erzeu-

gung einer durch die Konfiguration der Lichtverteilungseinrichtung vorgebbaren zweidimensionalen Intensitätsverteilung aus dem Licht der primären Lichtquelle in einer ersten Fläche des Beleuchtungssystems. Eine erste Rasteranordnung mit ersten Rasterelementen dient zum Empfang der räumlichen, zweidimensionalen Intensitätsverteilung und zur Erzeugung einer Rasteranordnung sekundärer Lichtquellen, welche Bilder der primären Lichtquelle sind. Die Anzahl sekundärer Lichtquellen entspricht dabei der Anzahl der beleuchteten ersten Rasterelemente. Eine zweite Rasteranordnung mit zweiten Rasterelementen dient dazu, das Licht der sekundären Lichtquellen zu empfangen und im Beleuchtungsfeld zumindest teilweise zu überlagern. Hierdurch wird eine Homogenisierung bzw. Vergleichmäßigung der Beleuchtungsintensität im Beleuchtungsfeld erreicht. Die zweite Rasteranordnung ist im Bereich einer Pupillenfläche des Beleuchtungssystems angeordnet. Diese Pupillenfläche kann bei eingebautem Beleuchtungssystem optisch konjugiert zu einer Pupillenebene eines nachfolgenden Projektionsobjektivs sein, so dass die Lichtverteilung in der Pupillenfläche des Beleuchtungssystems im wesentlichen die Lichtverteilung in der Pupille des Projektionsobjektivs bestimmt.

Die Lichtverteilungseinrichtung umfasst mindestens ein diffraktives optisches Element zur Erzeugung einer Winkelverteilung, deren Fernfeld getrennte oder zusammenhängende Leuchtzonen aufweist, die in Form und Größe auf die Form und Größe der ersten Rasterelemente der ersten Rasteranordnung abgestimmt sind. Durch die Abstimmung der Leuchtzonen auf die Rasterelemente können diese gezielt jeweils im Wesentlichen vollständig ausgeleuchtet werden. Dies hat zur Folge, dass praktisch keine die Homogenisierungswirkung des Wabenkondensors beeinträchtigende, teilweise Ausleuchtung von Rasterelementen auftritt. Die Verteilung der Leuchtzonen auf der ersten Rasteranordnung ist hierbei im Wesentlichen an die Form der gewünschten Austrittslichtverteilung angepasst, wobei der Rand der Verteilung eine Rasterung

aufweist, die durch die Form und Größe der Rasterelemente vorgegeben ist. Zur Verwendung in Lichtverteilungseinrichtungen geeignete diffraktive optische Elemente können für die Verwendung in Transmission oder in Reflexion ausgelegt sein und sind mit geringem Aufwand herstellbar.

Bei einer Ausführungsform des Beleuchtungssystems ist das diffraktive optische Element zur Einstellung einer zweidimensionalen Intensitätsverteilung in der ersten Fläche derart ausgebildet, dass durch die Intensitätsverteilung alle zu einer vorgegebenen Austrittslichtverteilung gehörenden ersten Rasterelemente im wesentlichen vollständig ausgeleuchtet werden, während nicht zu der Austrittslichtverteilung beitragende erste Rasterelemente im wesentlichen unausgeleuchtet bleiben. Dadurch ist eine besonders gleichmäßige Ausleuchtung des Beleuchtungsfeldes erzielbar. Als Austrittslichtverteilung wird hier die räumliche Intensitätsverteilung hinter der zweiten Rasteranordnung bezeichnet.

In einer Weiterbildung des Beleuchtungssystems ist das diffraktive optische Element derart ausgestaltet, dass die Leuchtzonen eine annähernd kreisförmige, annähernd annulare, oder annähernde Dipol- oder Multipol-Intensitätsverteilung mit einer der Form und Größe der ersten Rasterelemente entsprechenden Rasterung auf den ersten Rasterelementen der ersten Fläche erzeugen. Eine solche Ausleuchtung der ersten Fläche ermöglicht beispielsweise Austrittslichtverteilungen mit annähernd kreisförmigen Intensitätsverteilungen unterschiedlicher Durchmesser bzw. Kohärenzgrade, annähernd ringförmige Intensitätsverteilungen mit unterschiedlichen Ringbreiten und/oder unterschiedlichen Radien oder annähernd polare Intensitätsverteilungen mit beispielsweise zwei oder vier symmetrisch oder asymmetrisch zur optischen Achse des Systems verteilten Beleuchtungsschwerpunkten.

In einer Weiterbildung des Beleuchtungssystems ist zwischen der primären Lichtquelle und der ersten Rasteranordnung keine variabel einstellbare Optikkomponente, insbesondere weder ein verstellbares Axikon-System noch eine Zoomeinrichtung angeordnet. Zur Erzeugung der zweidimensionalen Intensitätsverteilung in der ersten Fläche des Beleuchtungssystems kommt daher ausschließlich das mindestens eine diffraktive optische Element zum Einsatz. Durch den Verzicht auf variabel einstellbare Optikkomponenten werden die Herstellungskosten für das Beleuchtungssystem gesenkt.

In einer Weiterbildung des Beleuchtungssystems umfasst die Lichtverteilungseinrichtung eine Wechseleinrichtung zum Austausch eines ersten diffraktiven optischen Elements zur Erzeugung einer ersten, zweidimensionalen Intensitätsverteilung gegen mindestens ein zweites, diffraktives optisches Element zur Erzeugung einer zweiten, zweidimensionalen Intensitätsverteilung, die sich von der ersten Intensitätsverteilung unterscheidet. Die Wechseleinrichtung kann z.B. als Linearwechsler oder als Drehwechsler ausgebildet sein. Durch den Austausch von diffraktiven optischen Elementen können unterschiedliche Beleuchtungsmodi variabel eingestellt werden. Beispielsweise ist es möglich, unterschiedliche Kohärenzgrade ( $\sigma$ -Wert) variabel einzustellen. Der Kohärenzgrad ist definiert als das Verhältnis der numerischen Apertur des Beleuchtungssystems zur numerischen Apertur eines nachfolgenden Projektionsobjekts. Bei Kenntnis der Beleuchtungsmodi, die in einem spezifischen Beleuchtungssystem zum Einsatz kommen, können ausschließlich die zur Erzeugung dieser Modi benötigten diffraktiven optischen Elemente im Beleuchtungssystem vorgesehen sein, so dass dem Anwender keine zusätzlichen Kosten durch nicht benötigte diffraktive Elemente oder aufwändig konstruierte variable optische Systeme entstehen. Die in einem Beleuchtungssystem zur Verfügung gestellten diffraktiven optischen Elemente können in ihrer Bauart auf die Bedürfnisse des Anwenders zugeschnitten sein.

In einer Weiterbildung des Beleuchtungssystems weist das diffraktive optische Element zwei oder mehr unterschiedlich strukturierte Teilbereiche auf, die zur Erzeugung einer der Anzahl der Teilbereiche entsprechenden Anzahl unterschiedlicher zweidimensionaler Lichtverteilungen wahlweise in den Strahlengang des Beleuchtungssystems einbringbar sind. Diffraktive optische Elemente mit mehreren Teilbereichen zur Einstellung unterschiedlicher Beleuchtungsmodi sind z.B. in der EP 1 109 067 A2 beschrieben.

In einer Weiterbildung des Beleuchtungssystems ist das diffraktive optische Element derart ausgestaltet, dass mindestens eine Leuchtzone mindestens ein Rasterelement vollständig ausleuchtet. Bei einer vollständigen Ausleuchtung von Rasterelementen durch Leuchtzonen ist z.B. bei der Erzeugung einer kreis- oder ringförmigen Intensitätsverteilung eine zusammenhängende Überdeckung derjenigen Rasterelemente mit Beleuchtungslicht möglich, die zur Austrittslichtverteilung beitragen. Die Rasterung des Rands der Lichtverteilung in der ersten Fläche ist hierbei durch die Form der Rasterelemente vorgegeben.

In einer vorteilhaften Ausführungsform des Beleuchtungssystems ist das diffraktive optische Element derart ausgestaltet, dass mindestens eine Leuchtzone mindestens ein Rasterelement bis auf einen schmalen Randbereich mit maximaler Strahlleistung ausleuchtet. Bei einer solchen Ausleuchtung werden die Grenzbereiche zwischen den Rasterelementen nicht oder nur mit stark verminderter Intensität ausgeleuchtet, so dass diese auch als Totzonen bezeichneten Bereiche in diesem Fall nicht zu Lichtverlust oder Streulichtbildung beitragen können.

Bei einer Weiterbildung des Beleuchtungssystems ist die primäre Lichtquelle ein Laser, der in mindestens einer die Lichtaufrichtung des Lichts enthaltenden Ebene eine Divergenz  $D_L$  aufweist. Eine maximale Diver-

genz des diffraktiven optischen Elements in der Ebene liegt bei  $D_{\max}$ . Eine Anzahl  $n$  der Rasterelemente der ersten Rasteranordnung zur Erzeugung einer Homogenisierungswirkung ist so vorgegeben, dass ein festgelegter, effektiver Transmissionsgrad  $T$  der auf das erste Rasterelement auftreffenden Strahlung nicht unterschritten wird. Der „effektive Transmissionsgrad“  $T$  ist hier definiert als das Verhältnis des Strahlungsanteils, der mit Flattop-Intensität auf ein erstes Rasterelement auftritt zur gesamten auf das Rasterelement auftreffenden Strahlung. Die Flattop-Intensität ist die mittlere Intensität im Flattop-Bereich, die in der Regel nicht völlig konstant ist. Der effektive Transmissionsgrad  $T$  setzt daher den für die Beleuchtung verwendbaren Nutzlichtanteil zur Summe aus dem Nutzlichtanteil und einem zu verwerfenden Lichtanteil ins Verhältnis, der für die Beleuchtung nicht genutzt werden sollte, wenn eine homogene Beleuchtung gewünscht ist. Der „effektive Transmissionsgrad“ berücksichtigt dabei, dass evtl. ein Teil der von dem Rasterelement abgegebenen Strahlung aufgewendet werden muss, um eine Lichtverteilung mit der gewünschten Homogenität zu erreichen. Hierbei wird von gleichartigen Rasterelementen ausgegangen, so dass der effektive Transmissionsgrad jedes einzelnen Rasterelements im Wesentlichen identisch ist und mit dem effektiven Transmissionsgrad der Rasteranordnung übereinstimmt. Als Divergenz wird hier der halbe Öffnungswinkel bezeichnet, den der Strahl in der die Lichtaufrichtung enthaltenden Ebene aufspannt.  $D_{\max}$  bezeichnet den Winkel zwischen der optischen Achse und dem Randstrahl, der den äußersten Rand der am weitesten von der optischen Achse entfernten ersten Rasterelemente trifft.

Die Homogenisierungswirkung des Wabenkondensors hängt von der Anzahl  $n$  der Rasterelemente ab, die zur Überlagerung in der Feldebene beitragen. Je besser die Homogenität des Beleuchtungslichts ausfallen soll, umso mehr Rasterelemente werden in der Regel benötigt. Andererseits wird durch jedes Rasterelement ein Randbereich erzeugt, der



einen Intensitätsabfall des Beleuchtungslichts verursacht. Zwischen einem Sollwert für den effektiven Transmissionsgrad des Wabenkondensors und der Homogenität des Beleuchtungslichts muss daher ein Kompromiss gefunden werden. Bei gegebener Anzahl  $n$  von Rasterelementen lässt sich mit Hilfe der Größen  $D_L$  und  $D_{Max}$  ein effektiver Transmissionsgrad  $T$  der Rasterelemente bestimmen. Dieser sollte einen bestimmten Wert, z.B. ca. 70% oder 80%, nicht unterschreiten.

Bei einer Weiterbildung des Beleuchtungssystems ist das diffraktive optische Element als computergeneriertes Hologramm (CGH) ausgebildet. Solche Elemente können eine Winkelverteilung erzeugen, die vorteilhaft an die Form und Größe der Rasterelemente der ersten Rasteranordnung angepasst ist. Zur Herstellung wird die zu fertigende Oberflächenstruktur des Elements über iterative Algorithmen mit Vorgabe einer Sollwinkelverteilung berechnet und die Oberflächenstruktur, z.B. mit einem mikrolithographischen Prozess, erzeugt.

In einer Ausführungsform des Beleuchtungssystems sind die Rasterelemente der ersten und/oder der zweiten Rasteranordnung als Mikrolinsen ausgebildet. Die Form der Linsen der ersten Rasteranordnung wird an die Form des Beleuchtungsfeldes angepasst, wobei rechteckige Formen bevorzugt sind. Bei Beleuchtungssystemen für Waferscanner können beispielsweise rechteckige Mikrolinsen mit hohem Aspektverhältnis zwischen Breite und Höhe vorgesehen sein.

In einer Weiterbildung des Beleuchtungssystems ist in der Nähe der Beleuchtungsfläche oder in der Nähe einer zu dieser konjugierten Ebene eine Abschattungsblende zur Erzeugung eines scharfen Randes (Heldunkel-Übergang) der Intensitätsverteilung vorgesehen. Die Abschattungsblende und deren Position sind so ausgelegt, dass diesen Teil der Intensitätsverteilung abschneidet bzw. ausblendet, in dem die Intensität nicht konstant ist (Flanke).

Bei einer Ausführungsform des Beleuchtungssystems ist zwischen dem diffraktiven optischen Element und der ersten Rasteranordnung mindestens eine Fourierlinsenanordnung angeordnet. Die Fourierlinsenanordnung, die eine oder mehrere Linsen umfassen kann, dient zur Umwandlung der durch das diffraktive optische Element erzeugten Winkelverteilung in eine Ortsverteilung in einer Feldebene hinter der Fourierlinsenanordnung. Das Fernfeld des diffraktiven optischen Elements wird durch die Fourierlinsenanordnung somit aus einer im Unendlichen liegenden Ebene in die Brennebene der Fourierlinsenanordnung gebracht. Dadurch können kompakte Bauformen realisiert werden.

Die Erfindung betrifft auch ein Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen, bei dem eine Beleuchtung eines in einer Objekebene eines Projektionsobjektivs angeordneten Retikels mit dem Licht einer primären Lichtquelle mit Hilfe eines erfindungsgemäß ausgebildeten Beleuchtungssystems erfolgt, sowie ein Bild des Retikels auf einem lichtempfindlichen Substrat erzeugt wird; wobei zur Beleuchtung des Retikels das diffraktive optische Element eine zweidimensionale Intensitätsverteilung in Form von Leuchtzonen auf der ersten Fläche des Beleuchtungssystems erzeugt, deren räumliche Verteilung im Wesentlichen der Form einer vorgebbaren Austrittslichtverteilung entspricht.

Bei einer Weiterbildung des Verfahrens wird ein Wechsel der Beleuchtungsmodi des Beleuchtungssystems ausschließlich durch Austausch des diffraktiven optischen Elements und/oder durch wahlweises Einbringen von unterschiedlich strukturierten Teilbereichen des diffraktiven optischen Elements in den Strahlengang des Beleuchtungssystems durchgeführt. Es ist bei dieser Weiterbildung somit möglich, zur Einstellung von Beleuchtungsmodi vollständig auf verstellbare Komponenten wie Axikon-Systeme oder Zoomeinrichtungen zu verzichten.

Die vorstehenden und weitere Merkmale gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich alleine oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen bei einer Ausführungsform der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein können und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungen darstellen können. Ausführungsbeispiele der Erfindung sind in den Zeichnungen dargestellt und werden im Folgenden näher erläutert.

10

Fig. 1 zeigt schematisch eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Beleuchtungssystems für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einer ersten und einer zweiten Rasteranordnung.

15

Fig. 2 zeigt eine schematische Draufsicht auf die erste Rasteranordnung von Fig. 1 mit einer im Wesentlichen kreisförmigen Intensitätsverteilung mit voneinander getrennten Leuchtzonen,

Fig. 3 zeigt schematisch eine stark vereinfachte Darstellung des Beleuchtungssystems von Fig. 1 zur Veranschaulichung des durch das diffraktive optische Element bereitgestellten Intensitätsverlaufs auf der ersten Rasteranordnung sowie auf dem Beleuchtungsfeld,

25

Fig. 4 zeigt eine Diagramm zur Veranschaulichung des Intensitätsverlaufs auf dem Beleuchtungsfeld, und

Fig. 5 zeigt eine schematische Draufsicht auf die erste Rasteranordnung von Fig. 1 mit einer im Wesentlichen kreisförmigen Intensitätsverteilung mit zusammenhängenden Leuchtzonen.

30

In Fig. 1 ist ein Beispiel eines Beleuchtungssystems 10 einer mikrolithographischen Projektionsbelichtungsanlage, genauer gesagt eines Wafer-Scanners gezeigt, die bei der Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen feinstrukturierten Bauteilen einsetzbar ist und zur Erzielung von Auflösungen bis zu Bruchteilen von Mikrometern mit Licht aus dem tiefen Ultraviolettbereich arbeitet. Die Scanrichtung des Wafer-Scanners (y-Richtung) verläuft senkrecht zur Zeichenebene. Als primäre Lichtquelle 11 dient ein  $F_z$ -Laser mit einer Arbeitswellenlänge von ca. 157 nm, dessen Lichtstrahl koaxial zur optischen Achse 12 des Beleuchtungssystems ausgerichtet ist. Andere UV-Lichtquellen, beispielsweise ArF-Excimer-Laser mit 193 nm Arbeitswellenlänge, KrF-Excimer-Laser mit 248 nm Arbeitswellenlänge sowie primäre Lichtquellen mit größeren oder kleineren Arbeitswellenlängen sind ebenfalls möglich.

Der vom Laser kommende Lichtstrahl mit kleinem Rechteckquerschnitt trifft zunächst auf eine Strahlaufweitungsoptik 13, die einen austretenden Strahl 14 mit weitgehend parallelem Licht und größerem Rechteckquerschnitt erzeugt. Das „weitgehend parallele Licht“ hat eine geringe Laserdivergenz, die um den Aufweitungsfaktor der Strahlaufweitungsoptik geringer ist als die Divergenz des einfallenden Strahls. Die Strahlaufweitungsoptik kann Elemente enthalten, die zur Kohärenzreduktion des Laserlichts dienen. Das weitgehend parallelisierte Laserlicht trifft danach auf ein diffraktives optisches Element 21, das als computergeneriertes Hologramm zur Erzeugung einer Winkelverteilung ausgebildet ist. Die durch das diffraktive optische Element 21 erzeugte Winkelverteilung wird beim Durchtritt durch eine Fourierlinsenanordnung 23, die in Brennweite vom diffraktiven optischen Element positioniert ist, in eine zweidimensional ortsabhängige Intensitätsverteilung umgewandelt. Die so erzeugte Intensitätsverteilung ist daher auf einer ersten Fläche 25 des Beleuchtungssystems vorhanden.

30

In der Nähe der ersten Fläche 25 oder mit dieser zusammenfallend liegt die Eintrittsfläche einer ersten Rasteranordnung 35 mit ersten Rasterelementen 36, die als Mikrolinsen mit positiver Brechkraft und einem Rechteckquerschnitt mit großem Aspektverhältnis zwischen Breite und Höhe ausgebildet sind (vgl. Fig. 2). Die Rechteckform der Mikrolinsen 36 entspricht der Rechteckform des zu beleuchteten Feldes (dem Scannerfeld eines Wafer-scanners), weshalb die ersten Rasterelemente auch als Feldwaben 36 bezeichnet werden. Die ersten Rasterelemente 36 sind in einem der Rechteckform der Feldwaben entsprechenden rechteckigen Raster (kartesisches Raster) direkt aneinander angrenzend, d.h. im wesentlichen flächenfüllend angeordnet.

Das diffraktive optische Element 21 bewirkt, dass das in die erste Fläche 25 einfallende Licht in eine der Anzahl der zu beleuchtenden Einzelninsen 36 entsprechende Anzahl von rechteckförmigen Leuchtzonen 70 aufgeteilt wird, die entsprechend der Brechkraft der Mikrolinsen 36 in den jeweils zugehörigen Fokusbereichen derselben fokussiert werden. Dadurch entsteht eine der Anzahl beleuchteter Linsen 36 entsprechende Anzahl sekundärer Lichtquellen, die in einer Rasteranordnung angeordnet sind. Die einzelnen Positionen der sekundären Lichtquellen werden dabei durch die jeweiligen Fokusspositionen der Einzelninsen 36 bestimmt.

Mit Abstand hinter der ersten Rasteranordnung 35 ist eine zweite Rasteranordnung 40 mit zweiten Rasterelementen 41 angeordnet, die im Beispielsfall ebenfalls als Mikrolinsen mit positiver Brechkraft ausgebildet sind. Die zweiten Rasterelemente werden auch als Pupillenwaben bezeichnet und sind im Bereich einer zweiten Fläche 45 des Beleuchtungssystems angeordnet, welche eine Fourier-transformierte Ebene zur ersten Fläche 25 ist. Die zweite Fläche 45 ist eine Pupillenebene des Beleuchtungssystems und ist bei einem in eine Projektionsbelichtungsanlage eingebauten Beleuchtungssystem optisch

konjugiert zur einer Pupillenebene des Projektionsobjektivs, dessen Objektenebene (Reitkelebene) mit Hilfe der Beleuchtungseinrichtung beleuchtet wird. Die zweiten Rasterelemente 41 sind in der Nähe der jeweiligen sekundären Lichtquellen angeordnet und bilden über eine nachgeschaltete, zoombare Feldlinse 47 die Feldwaben 36 in eine Beleuchtungsfläche 50 des Beleuchtungssystems ab, in der das rechtwinklige Beleuchtungsfeld 51 liegt. Die rechtwinkligen Bilder der Feldwaben 36 werden dabei im Bereich des Beleuchtungsfeldes 51 mindestens teilweise überlagert. Diese Überlagerung bewirkt eine Homogenisierung bzw. Vergleichmäßigung der Lichtintensität im Bereich des Beleuchtungsfeldes 51.

Die Rasterelemente 35, 40 übernehmen bei diesem Beleuchtungssystem die Funktion einer Lichtmischeneinrichtung 55, die der Homogenisierung der Beleuchtung im Beleuchtungsfeld 51 dient und die die einzige Lichtmischeneinrichtung des Beleuchtungssystems ist.

Die Beleuchtungsfläche 50, in der das Beleuchtungsfeld 51 liegt, ist eine Feldzwischenenebene des Beleuchtungssystems, in der ein Reitkel-Masking-System (REMA) 60 angeordnet ist, welches als verstellbare Abschattungsblende zur Erzeugung eines scharfen Randes der Intensitätsverteilung dient. Das nachfolgende Objektiv 65 bildet die Zwischenfielebene mit dem Maskierungssystem 60 auf das Reitkel (die Maske bzw. die Lithographievorlage) ab, das sich in der Reitkelebene 69 befindet. Der Aufbau solcher Abbildungsobjektive 65 ist an sich bekannt und wird daher hier nicht näher erläutert. Es gibt auch Ausführungsformen ohne ein solches Abbildungssystem; bei diesen kann die Beleuchtungsfläche 50 mit der Reitkelebene (Objektebene eines nachfolgenden Projektionsobjektivs) zusammenfallen.

Mit dem Beleuchtungssystem 10 ist es auf einfache Weise möglich, verschiedene Beleuchtungsmodi bereitzustellen, indem zur Erzeugung

unterschiedlicher, jeweils fest vorgebarer Lichtverteilungen das diffraktive optische Element 21 mittels einer als Linearwechsler ausgebildeten Wechseleinrichtung 20 gegen ein diffraktives optisches Element mit anderer Abstrahlcharakteristik ausgetauscht wird, das in der Wechseleinrichtung 20 vorgesehen ist. Ein zum Austausch vorgesehenes diffraktives optisches Element 22 ist beispielhaft im Inneren des Linearwchslers 20 gezeigt. Durch den Austausch diffraktiver optischer Elemente können z.B. unterschiedliche, jeweils fest vorgebbare Kohärenzgrade ( $\sigma$ -Abstufungen), z.B. zwischen 0,05 und 0,1, erzeugt werden. Alternativ ist zur Erzeugung verschiedener Beleuchtungsmodi auch die Verwendung eines einzelnen diffraktiven optischen Elements möglich, welches mehrere unterschiedlich strukturierte Teilbereiche zur Erzeugung einer Anzahl der Teilbereiche entsprechenden Anzahl von Lichtverteilungen aufweist.

15

Dieses Beleuchtungssystem bildet zusammen mit einem (nicht gezeigten) Projektionsobjektiv und einem verstellbaren Retikel-Halter, der das Retikel in der Objektebene des Projektionsobjektivs (Retikelebene 69) hält, eine Projektionsbelichtungsanlage für die mikrolithographische Herstellung von elektronischen Bauteilen, aber auch von diffraktiven optischen Elementen und anderen mikrostrukturierten Teilen.

20

Bei dem hier gezeigten Scanner-System wird auf dem Retikel ein schmaler Streifen, typischerweise ein Rechteck mit einem Aspektverhältnis von 1:2 bis 1:8, beleuchtet und durch Scannen das gesamte strukturierte Feld eines Chips seriell beleuchtet. Auch eine Verwendung in Wafer-Steppern ist möglich, bei denen die gesamte, einem Chip entsprechende strukturierte Fläche so gleichmäßig und randscharf wie möglich beleuchtet wird.

30

Anhand von Fig. 2 werden Besonderheiten der Rasteranordnung 35 der Lichtmischeinrichtung 55 näher erläutert. In dem schematisch dargestel-

ten Beispiel besteht die erste Rasteranordnung 35 aus einer quadratischen Anordnung mit insgesamt 91 rechteckigen Mikrolinsenelementen (erste Rasterelemente) 36, die direkt aneinander angrenzend nebeneinander bzw. übereinander angeordnet sind und die quadratische Fläche lückenlos ausfüllen. Die Rechteckform der Rasterelemente 36 mit einem Aspektverhältnis zwischen Breite und Höhe von ca. 4:1 entspricht der Rechteckform des zu beleuchtenden Feldes 51. In Fig. 2 sind diejenigen Rasterelemente hervorgehoben, die zur Erzeugung einer näherungsweise kreisförmigen Austrittslichtverteilung durch das diffraktive optische Element 21 ausgeleuchtet werden und auf denen daher im Betrieb des Beleuchtungssystems jeweils eine Leuchtzone 70 erzeugt wird. Jedes einzelne ausgeleuchtete Rasterelement wird bis auf einen Randbereich 71 mit maximaler Strahlungsintensität von der Beleuchtungsstrahlung getroffen, so dass die Leuchtzonen 70 der Intensitätsverteilung nicht zusammenhängen. Durch den Verzicht auf die Ausleuchtung der Randbereiche 71 der Mikrolinsen können Lichtverluste vermieden werden, die durch die Absorption von Beleuchtungsstrahlung oder Lichtstreuung in diesen, auch als Totzonen bezeichneten Randbereichen entstehen.

20

Fig. 3 zeigt schematisch eine stark vereinfachte Ausführungsform eines Beleuchtungssystems zur Veranschaulichung des durch das diffraktive optische Element bereitgestellten Intensitätsverlaufs auf der Rasteranordnung sowie auf dem Beleuchtungsfeld des Beleuchtungssystems von Fig. 1. Die für diese Veranschaulichung relevanten Komponenten des Beleuchtungssystems von Fig. 1 sind in Fig. 3 mit um hundert erhöhten Bezugszeichen dargestellt. Die Divergenz des aufgeweiteten Lasers senkrecht zur Scanrichtung, d.h. in x-Richtung in der Zeichenebene, liegt bei  $D_L = 1$  mrad. Die von dem diffraktiven optischen Element 121 erzeugte Winkelverteilung wird mit der Laserdivergenz gefaltet und flacht die von diesem erzeugte, steiflankige Winkelverteilung ab, so dass der Intensitätsverlauf der auf den Rasterelementen erzeugten Leuchtzonen 200 ebenfalls Flanken aufweist, deren Breite bei 1 mrad

30

liegt. Die Laserdivergenz bzw. die Divergenz der aufgeweiteten Strahlung (hier: 1 mrad) bezieht sich hier auf eine räumliche Ausdehnung in der Pupillenebene (Ort des Rasterelementes). Die Ausdehnung der Flanke skaliert somit mit der Brennweite der Linse 123.

Bei den hier auftretenden, kleinen Strahlwinkeln können Winkelmaße 1:1 in Längemaße umgerechnet werden, so dass den Divergenzwerten Längenwerte entsprechen, wovon im Folgenden Gebrauch gemacht wird. Durch die aufgrund der Laserdivergenz hervorgerufenen Flanken entsteht ein trapezförmiger Intensitätsverlauf auf den Leuchtzonen 200 mit einem Plateau 203 konstanter Intensität sowie zwei Flanken 202, 204 mit linear abfallender Intensität (Top-Hat-Verteilung). Der trapezförmige Intensitätsverlauf der Leuchtzonen 200 findet sich aufgrund der Überlagerung durch die Lichtverteilungseinrichtung 155 auch auf dem Beleuchtungsfeld 151 wieder.

Fig. 4 zeigt ein Diagramm zur Veranschaulichung des Intensitätsverlaufs auf dem Beleuchtungsfeld senkrecht zur Scanrichtung (x-Richtung). Diese ist symmetrisch zur optischen Achse 112 mit einer ersten, weitgehend linear ansteigenden Flanke 202, einem Plateau 203 idealerweise konstanter Lichtintensität  $I_{\max}$  und einer zweiten, linear abfallenden Flanke 204 ausgebildet. Die im Realfall normalerweise nicht konstante Intensität im Plateaubereich wird hier als „Flattop-Intensität“ bezeichnet. Die Intensitätsverteilung 201 sollte über das gesamte Beleuchtungsfeld 151 hinweg eine konstante Intensität aufweisen (Plateau), die an den Rändern des Beleuchtungsfeldes in einem möglichst schmalen Bereich (Flanke) auf Null abfällt (Top-Hat-Verteilung). Da der Intensitätsverlauf nicht steil genug abfällt, schneidet zur Erzeugung scharfer Kanten eine in Fig. 3 gezeigte Blende 156 die Flankenbereiche 205, 206 des trapezförmigen Intensitätsverlaufs 201 so ab, dass der in Fig. 4 gestrichelt gezeigte Intensitätsverlauf entsteht. Durch das Abschneiden bzw. Ausblenden der Flanken entsteht ein Transmissionsverlust, der möglichst gering ausfallen sollte. Um dies zu

erreichen, muss dafür Sorge getragen werden, dass der (gestrichelt gezeichnete) Anteil der Strahlintensität in den Flankenbereichen im Vergleich zum Strahlungsanteil in Bereich 206 höchster Intensität möglichst klein ist. Dies kann z.B. durch eine möglichst schmale Flankenbreite  $\phi_F$  erreicht werden. Die Breite  $\phi_F$  des Bereichs, in dem der Intensitätsabfall auftritt, stimmt wie schon erwähnt mit der Laserdivergenz  $D_L$  am Ort der ersten Rasterelemente überein ( $D_L = \phi_F$ ).

Die Lichtmischeinrichtung 155 soll eine möglichst gute Homogenisierung der Beleuchtungsstrahlung ermöglichen. Diese ist in der Regel umso besser, je mehr Rasterelemente 136, 141 zur Überlagerung beitragen. Der Bereich, der an einem einzelnen Rasterelement mit maximaler Strahlleistung ausgeleuchtet wird, ist aber umso kleiner, je mehr Rasterelemente zur Verfügung stehen, da das Verhältnis zwischen (divergenzbedingter) Flankenbreite und Plateaubreite ungünstiger (größer) wird, je schmaler die Rasterelemente sind. Es ist daher nötig, einen Kompromiss aus Homogenität, bedingt durch die Zahl der Rasterelemente, und effektivem Transmissionsgrad der Beleuchtungsstrahlung, begrenzt durch die Notwendigkeit zum Ausblenden von Flankenanteilen, zu finden. Hierzu ist es einerseits möglich, einen gewünschten effektiven Transmissionsgrad vorzugeben und die maximale Anzahl von Rasterelementen 136, 141 zu bestimmen, für die dieser effektive Transmissionsgrad noch zu erreichen ist. Es ist andererseits auch möglich, die Zahl der Rasterelemente entsprechend der gewünschten Homogenisierungswirkung vorzugeben und daraus den effektiven Transmissionsgrad zu errechnen. Letzteres Vorgehen wird im folgenden beschrieben, wobei ersteres Vorgehen selbstverständlich ebenfalls möglich ist.

Ausgehend von einer Anzahl  $n=11$  von ersten und zweiten Rasterelementen 136, 141 zur Erzeugung einer vorgegebenen Homogenisierungswirkung, von denen zur Vereinfachung der Darstellung in Fig. 3 nur vier gezeigt sind, wird zunächst bestimmt, wie groß der für ein einzelnes

Element zur Verfügung stehende Winkelbereich ist. Hierzu wird die doppelte maximale Divergenz des diffraktiven optischen Elements 2  $D_{\text{Max}}$  (voller Öffnungswinkel), der im hier betrachteten Fall bei ca. 60 mrad liegt, durch die Zahl der Rasterelemente geteilt. Ein einzelnes Rasterelement entspricht daher einem Beleuchtungswinkel von  $\phi_{\text{tot}} = 60$  mrad/ 11 = 5,4545 mrad. Bei einer Laserdivergenz von  $D_L = \phi_F = 1$  mrad beträgt der mit maximaler Strahlleistung ausgeleuchtete Beleuchtungswinkel eines Rasterelements somit  $\phi_{\text{max}} = \phi_{\text{tot}} - 2 \cdot \phi_F = 5,4545 \text{ mrad} - 2 \text{ mrad} = 3,4545 \text{ mrad}$  (vergleiche hierzu auch Fig. 4). Die Breite des mit maximaler Intensität ausgeleuchteten Bereichs  $\phi_{\text{max}}$  entspricht der Breite des Beleuchtungsfeldes 151 in x-Richtung, d.h. des Teils der Beleuchtungsfläche 150, der nicht von der Blende 160 abgeschnitten wird. Die gesamte Strahlung S, die pro Zeiteinheit auf der Beleuchtungsfläche 150 auftrifft, ergibt sich als Integral über die Intensität, d.h. als die Fläche, die unter der Intensitätsverteilung von Fig. 4 liegt. Der Teil der Strahlung, der mit maximaler Strahlleistung auf der Beleuchtungsfläche auftrifft, ergibt sich zu  $S_{\text{max}} = \phi_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}}$ . Zur Bestimmung des effektiven Transmissionsgrads T ist dieser ins Verhältnis zu setzen mit der gesamten auf die Beleuchtungsfläche 150 auftreffenden Strahlung. Diese ist gegeben durch die gesamte Trapezfläche, d.h. den Anteil  $S_{\text{max}}$  plus die Strahlung des auf die beiden Flankenbereichen auftreffenden Lichts  $S_F$ , d.h. der zwei schraffierten Dreiecksflächen 205, 206 in Fig. 4, so dass  $S_{\text{tot}} =$

$$S_{\text{max}} + S_F = \phi_{\text{max}} \cdot I_{\text{max}} + \phi_F \cdot I_{\text{max}}$$

Im vorliegenden Beispiel ist  $T = 3,4545 \text{ mrad} / (3,4545 \text{ mrad} + 1 \text{ mrad}) = 0,78$ . Legt man eine Laserdivergenz von  $D_L = 0,5$  mrad zugrunde, so ergibt sich bei gleicher Anzahl von Rasterelementen und identischem  $D_{\text{Max}}$  eine effektive Transmission  $T = 4,4545 \text{ mrad} / (4,4545 \text{ mrad} + 0,5 \text{ mrad}) = 0,90$ . Wird die Anzahl der Rasterelemente z.B. auf 21 erhöht, so ergibt sich bei gleichen Bedingungen ein effektiver Transmissionswert von  $T = 1,86 \text{ mrad} / (1,86 \text{ mrad} + 0,5 \text{ mrad}) = 0,79$ . Soll somit beispielsweise ein effektiver Transmissionsgrad von mehr als 80% erreicht werden, so

erweist sich bei einer Laserdivergenz  $D_L$  zwischen 0,5 und 1 mrad und einer maximalen Divergenz des diffraktiven Elements  $D_{\text{max}}$  von 30 mrad eine Anzahl der Rasterelemente der ersten Rasteranordnung zwischen 10 und 22 als guter Kompromiss zwischen effektivem Transmissionsgrad des Wabenkondensors und dessen Homogenisierungswirkung.

Ein Abschneiden der Kanten mit einer Blende 160 ist nur senkrecht zur Scanrichtung nötig, so dass entlang der Scanrichtung kein Lichtverlust auftritt. Dadurch können in Scanrichtung mehrere Rasterelemente mit zusammenhängenden Leuchtzonen ausgeleuchtet werden, ohne dass eine Verminderung der Transmission eintritt. Bei Verwendung eines Wafer-Steppers ist hingegen darauf zu achten, dass das Beleuchtungsfeld in zwei Raumrichtungen möglichst steile Flanken aufweist.

Fig. 5 zeigt eine schematische Draufsicht auf die erste Rasteranordnung von Fig. 1 mit einer zusammenhängenden, im Wesentlichen kreisförmigen Intensitätsverteilung. Der für die Erzeugung der Austrittslichtverteilung vorgesehene Teil der Rasterelemente 36 wird von Leuchtzentren 72 überdeckt, die ohne Zwischenräume ausgeleuchtet werden. Eine solche Ausleuchtung ist für die Transmission zwar nicht optimal, wenn steile Flanken des Beleuchtungsfeldes 151 gefordert sind, da beim Ausblenden ein höherer Anteil des Beleuchtungslichts verloren geht als bei dem in Fig. 2 gezeigten Beispiel. Jedoch ist die Strahlungsbelastung des Materials der Rasterelemente in diesem Fall geringer. Es ist auch möglich, nur die Zwischenräume in y-Richtung (Scanrichtung) zu füllen, die Zwischenräume in der dazu senkrechten x-Richtung jedoch, wie in Fig. 2 gezeigt, unbeleuchtet zu lassen. Diese Variante ist in Fig. 5 gestrichelt dargestellt. Dadurch kann bei Scannersystemen die Materialbelastung der Rasterelemente ohne Verlust an Transmission verringert werden. Ein entsprechendes diffraktives optisches Element würde somit ein Streifenmuster mit in y-Richtung durchgehend

verlaufenden streifenförmigen Intensitätsbereichen (Leuchzonen) erzeugen, zwischen denen in x-Richtung kleine Abstände liegen.

- Hier wurde anhand von Ausführungsbeispielen mit relativ wenigen
- 5 Waben eine grobe Rasterung in Radialrichtung erzielt. Eine Feldwabplatte und/oder eine Pupillenwabplatte kann jedoch auch deutlich mehr als die gezeigten Rasterelemente enthalten, beispielsweise mehr als 20 oder mehr als 50 oder mehr als 100 oder mehr als 200 – 500 Rasterelemente. Hierdurch kann eine dem Bedarf angepasste, feine
- 10 Rasterung der erzeugten Intensitätsverteilungen erreicht werden.

Die Erfindung wurde anhand von Ausführungsbeispielen erläutert, bei denen alle Rasterelemente Linsen aus einem für das Licht der Arbeitswellenlänge transparenten Material, beispielsweise Kalziumfluorid, bestehen. Je nach Anwendungsbereich können die Rasteranordnungen 35, 40 auch durch Spiegel oder beugende Strukturen gebildet sein. Dadurch können für EUV geeignete Beleuchtungssysteme bereitgestellt werden.

- 20 Obwohl eine Einstellung der Beleuchtungsmodi über den Wechsel von diffraktiven optischen Elementen bzw. mehrerer Teilbereiche eines diffraktiven optischen Elements für gewöhnlich ausreichend ist, kann es angezeigt sein, in bestimmten Fällen zusätzlich verstellbare optische Elemente zwischen primärer Lichtquelle und erster Rasteranordnung
- 25 vorzusehen.

# Patentansprüche

1. Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage zur Beleuchtung eines Beleuchtungsfeldes mit dem Licht einer primären Lichtquelle mit:
  - einer optischen Achse (12, 112);
  - einer Lichtverteilungseinrichtung (55, 155) zum Empfang von Licht der primären Lichtquelle (11) und zur Erzeugung einer vorgebbaren, zweidimensionalen Intensitätsverteilung aus dem Licht der primären Lichtquelle in einer ersten Fläche (25) des Beleuchtungssystems;
  - einer ersten Rasteranordnung (35, 135) mit ersten Rasterelementen (36, 136) zum Empfang der räumlichen, zweidimensionalen Intensitätsverteilung und zur Erzeugung einer Rasteranordnung sekundärer Lichtquellen;
  - einer zweiten Rasteranordnung (40, 140) mit zweiten Rasterelementen (41, 141) zum Empfang von Licht der sekundären Lichtquellen und zur mindestens teilweisen Überlagerung von Licht der sekundären Lichtquellen in dem Beleuchtungsfeld (51, 151);
  - wobei die Lichtverteilungseinrichtung mindestens ein diffraktives optisches Element (21, 121) zur Erzeugung einer Winkelverteilung umfasst, deren Fernfeld getrennte oder zusammenhängende Leuchzonen (70, 72) aufweist, die in Form und Größe auf die Form und Größe der ersten Rasterelemente (36, 136) der ersten Rasteranordnung abgestimmt sind.
2. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1, bei dem das diffraktive optische Element (21, 121) zur Einstellung einer zweidimensionalen Intensitätsverteilung in der ersten Fläche (35) derart ausgebildet ist, dass durch die Intensitätsverteilung alle zu einer vorgegebenen Austrittslichtverteilung gehörenden ersten Rasterelemente (70, 72)



im wesentlichen vollständig ausgeleuchtet werden, während nicht zu der Austrittslichtverteilung beifragende erste Rasterelemente im wesentlichen unausgeleuchtet bleiben.

3. Beleuchtungssystem nach Anspruch 1 oder 2, bei dem das diffraktive optische Element (21, 121) derart ausgestaltet ist, dass die Leuchtzonen (70, 72) eine annähernd kreisförmige, annähernd annulare, oder angenäherte Dipol- oder Multipol-Intensitätsverteilung mit einer der Form und Größe der ersten Rasterelemente entsprechenden Rasterung auf den Rasterelementen (36, 136) der ersten Ebene erzeugen.
4. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen der primären Lichtquelle (11) und der ersten Rasteranordnung (35, 135) keine Zoomeinrichtung angeordnet ist.
5. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen der primären Lichtquelle (11) und der ersten Rasteranordnung (35, 135) kein Axikon-System angeordnet ist.
6. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen der primären Lichtquelle (11) und der ersten Rasteranordnung (35, 135) keine variabel einstellbare Optikkomponente angeordnet ist.
7. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Lichtverteilungseinrichtung eine Wechseleinrichtung (20) zum Austausch eines ersten diffraktiven optischen Elements (21) zur Erzeugung einer ersten, zweidimensionalen Intensitätsverteilung gegen mindestens ein zweites, diffraktives optisches Element (22) zur Erzeugung einer zweiten, zweidimensionalen

Intensitätsverteilung, die sich von der ersten Intensitätsverteilung unterscheidet, umfasst.

8. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das diffraktive optische Element (21) zwei oder mehr unterschiedlich strukturierte Teilbereiche aufweist, die zur Erzeugung von einer der Anzahl der Teilbereiche entsprechenden Anzahl unterschiedlicher, zweidimensionaler Lichtverteilungen wahlweise in den Strahlengang des Beleuchtungssystems einbringbar sind.
9. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das diffraktive optische Element (21) derart ausgestaltet ist, dass mindestens ein Leuchtzone (72) mindestens ein Rasterelement vollständig ausleuchtet.
10. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das diffraktive optische Element (21) derart ausgestaltet ist, dass mindestens ein Leuchtzone (70) mindestens ein Rasterelement bis auf einen schmalen Randbereich (71) mit maximaler Intensität ausleuchtet.
11. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die primäre Lichtquelle ein Laser (11) ist, der in mindestens einer die Lichtlaufrichtung des Lichts enthaltenden Ebene eine Divergenz  $D_L$  aufweist, bei dem eine maximale Divergenz des diffraktiven optischen Elements in der Ebene bei  $D_{Max}$  liegt und bei dem eine Anzahl  $n$  der Rasterelemente der ersten Rasteranordnung zur Erzeugung einer Homogenisierungswirkung so vorgegeben ist, dass ein festgelegtes Verhältnis (effektiver Transmissionsgrad  $T$ ) des mit Flatop-Intensität auf das erste Rasterelement (36, 136) auftreffenden Strahlungsanteils zur gesamten auf das erste



Rasterelement (36, 136) auftreffenden Strahlung nicht unter-  
schritten wird.

12. Beleuchtungssystem nach Anspruch 11, bei dem der effektive Transmissionsgrad  $T$  größer als 70%, vorzugsweise größer als 80% ist
13. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die primäre Lichtquelle ein Laser (11) ist, der in mindestens einer die Lichtaufrichtung des Lichts enthaltenden Ebene eine Divergenz zwischen 0,5 und 1 mrad aufweist, bei dem die maximale Divergenz des diffraktiven Elements (21, 121) in der Ebene bei 30 mrad liegt, und bei dem die Anzahl der Rasterelemente (36, 136) der ersten Rasteranordnung (35, 135) in der Ebene zwischen 10 und 22 liegt.
14. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem das diffraktive optische Element (21, 121) als computer-generiertes Hologramm ausgebildet ist.
15. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem die Rasterelemente (36, 136, 41, 141) der ersten und/oder der zweiten Rasteranordnung als Mikrolinsen ausgebildet sind.
16. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem in der Nähe der Beleuchtungsfläche (50) oder in der Nähe einer zu dieser konjugierten Ebene (70) eine Abschattungsblende (60, 160) zur Erzeugung eines scharfen Randes der Intensitätsverteilung vorgesehen ist.
17. Beleuchtungssystem nach einem der vorhergehenden Ansprüche, bei dem zwischen dem diffraktiven optischen Element (21, 121) und

der ersten Rasteranordnung mindestens eine Fourierlinsenanordnung (23, 123) angeordnet ist.

18. Verfahren zur Herstellung von Halbleiterbauelementen und anderen fein strukturierten Bauteilen mit folgenden Schritten:  
Beleuchtung eines in einer Objektebene (70) eines Projektionsobjektivs angeordneten Retikels mit dem Licht einer primären Lichtquelle (11) mit Hilfe eines Beleuchtungssystems, das nach einem der Ansprüche 1 bis 17 ausgebildet ist;  
Erzeugung eines Bildes des Retikels auf einem lichtempfindlichen Substrat;  
wobei zur Beleuchtung des Retikels das diffraktive optische Element (21, 121) eine zweidimensionale Intensitätsverteilung in Form von Leuchtzonen (70, 72) auf der ersten Fläche (25) des Beleuchtungssystems erzeugt, deren räumliche Verteilung im Wesentlichen der Form einer vorgebbaren Austrittslichtverteilung entspricht.
19. Verfahren nach Anspruch 18, bei dem ein Wechsel von Beleuchtungsmodi des Beleuchtungssystems ausschließlich durch Austausch des diffraktiven optischen Elements (21, 121) und/oder durch wahlweises Einbringen von unterschiedlich strukturierten Teilbereichen des diffraktiven optischen Elements (21, 121) in den Strahlengang des Beleuchtungssystems durchgeführt wird.

Zusammenfassung

Ein Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage hat eine Lichtverteilungseinrichtung (21), die aus dem Licht einer primären Lichtquelle, beispielsweise eines Lasers, in einer ersten Fläche (25) des Beleuchtungssystems eine zweidimensionale Intensitätsverteilung erzeugt. Ein Wabenkondensor (55) mit einer ersten und einer zweiten Rasteranordnung (40) optischer Elemente dient als Lichtmischeinrichtung zur Homogenisierung der Beleuchtung im Beleuchtungsfeld des Beleuchtungssystems. Der Wabenkondensor hat eine erste Rasteranordnung (35) erster Rasterelemente (36) sowie eine zweite Rasteranordnung (40) zweiter Rasterelemente (41). Die Lichtverteilungseinrichtung umfasst mindestens ein diffraktives optisches Element (21) zur Erzeugung einer Winkelverteilung, deren Fernfeld getrennte oder zusammenhängende Leuchtzonen aufweist, die auf die Form und Größe der ersten Rasterelemente (36) abgestimmt sind.

(Hierzu Fig. 1).

Zusammenfassung

Ein Beleuchtungssystem für eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage hat eine Lichtverteilungseinrichtung (21), die aus dem Licht einer primären Lichtquelle, beispielsweise eines Lasers, in einer ersten Fläche (25) des Beleuchtungssystems eine zweidimensionale Intensitätsverteilung erzeugt. Ein Wabenkondensor (55) mit einer ersten und einer zweiten Rasteranordnung (40) optischer Elemente dient als Lichtmischeinrichtung zur Homogenisierung der Beleuchtung im Beleuchtungsfeld des Beleuchtungssystems. Der Wabenkondensor hat eine erste Rasteranordnung (35) erster Rasterelemente (36) sowie eine zweite Rasteranordnung (40) zweiter Rasterelemente (41). Die Lichtverteilungseinrichtung umfasst mindestens ein diffraktives optisches Element (21) zur Erzeugung einer Winkelverteilung, deren Fernfeld getrennte oder zusammenhängende Leuchtzonen aufweist, die auf die Form und Größe der ersten Rasterelemente (36) abgestimmt sind.

(Hierzu Fig. 1).



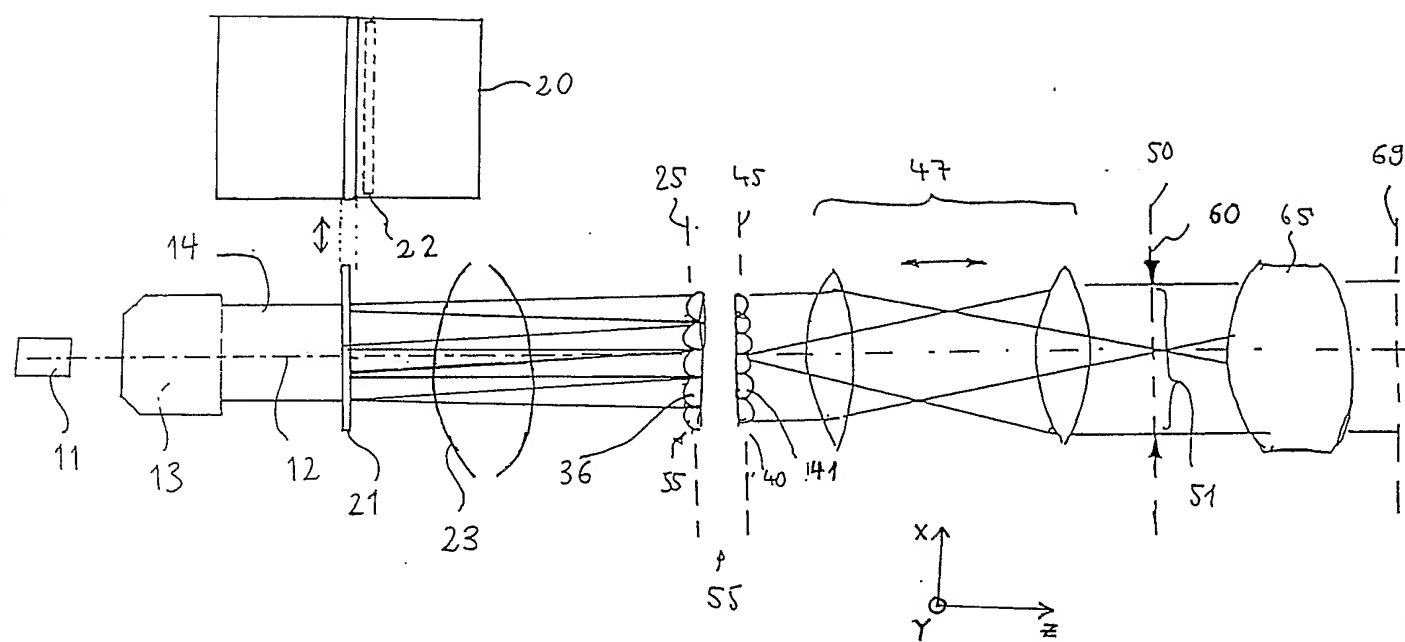


Fig. 1

10

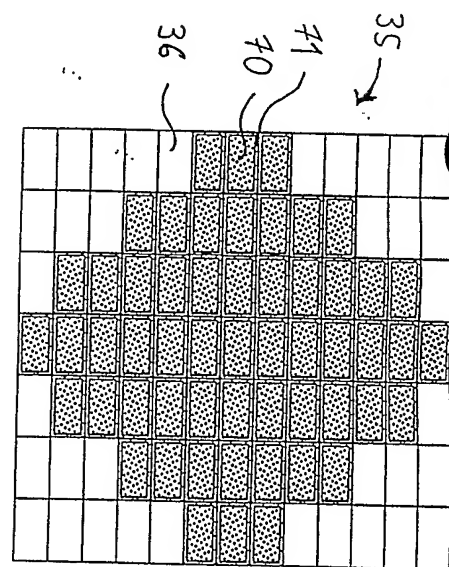


Fig. 2

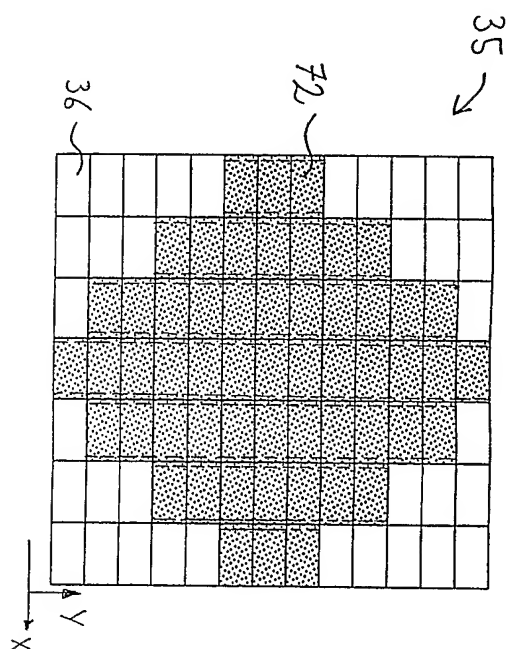


Fig. 5

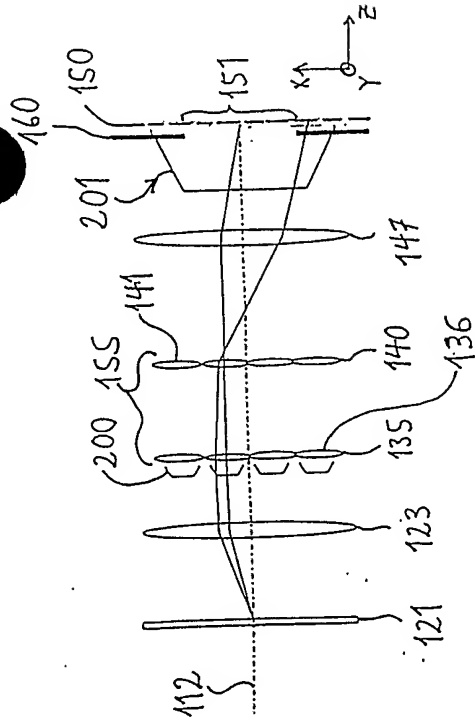


Fig. 3

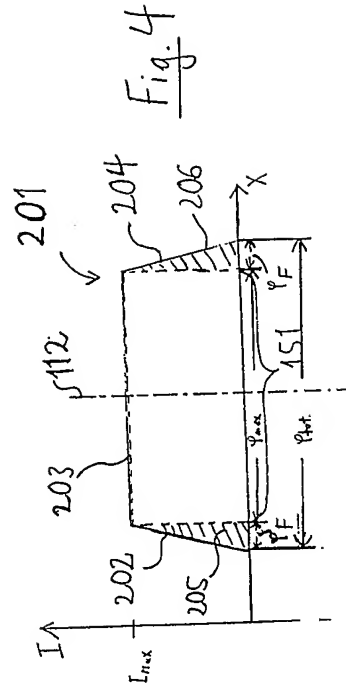


Fig. 4

